LUCRAREA 16

PIERDERI PRIN FRECARE ÎN RULMENȚI

1. Scopul lucrării

Aprecierea pierderilor prin frecare în rulmenții radiali. Studierea influenței forței radiale şi a turației asupra momentului rezistent din rulment.

2. Elemente teoretice

2.1. Cauzele pierderilor prin frecare în rulmenți

Rulmenții, bazați în principal pe realizarea unei mişcări de rostogolire între elementele de contact, realizează în funcționare un moment rezistent determinat de un complex de cauze:

- microalunecări generate de deformațiile elastice ale corpurilor şi căilor de rostogolire;
- histerezisul elastic al materialului supus deformațiilor de contact;
- alunecări generate de mişcarea de pivotare a corpurilor de rostogolire;
- alunecare între corpurile de rostogolire şi colivie;
- frecarea vâscoasă dintre lubrifiant şi ansamblul colivie-corpuri de rostogolire;
- frecarea din etanşări.

Ponderea cauzelor menționate în valoarea momentului rezistent total este dependentă atât de regimul de funcționare a rulmentului (sarcină, turație, natura lubrificației), cât şi de tipodimensiunea acestuia, ceea ce face extrem de dificilă obținerea unei relații cantitative cu valabilitate generală.

2.2. Relații de calcul

Pentru aplicații practice curente (forțe şi turații medii) se utilizează relații simple care consideră explicit numai o parte din cauzele prezentate anterior, restul fiind înglobate în *coeficienții apreciați experimental*.
Relația propusă de SKF, [1], separă momentul rezistent de frecare în două componente:

$$M_{rf} = \phi_{ish} \cdot \phi_{rs} \cdot M_{rr} + M_{sl} \qquad (1)$$

unde: - M_{rr} este momentul rezistent datorat mişcării de rostogolire;
- M_{sl} este momentul rezistent datorat mişcării de alunecare;

- ϕ_{ish} este factorul determinat de creşterea temperaturii în filmul de lubrifiant din rulment;
- ϕ_{rs} este factorul determinat de fenomenul de starvare, (lipsa de lubrifiant în zona contactului).

Pentru componenta M_{rr} este propusă relația:

$$M_{rr} = G_{rr} \cdot (\nu \cdot n)^{0.6} \ [\text{N} \cdot \text{mm}] \tag{2}$$

unde: - ν este vâscozitatea cinematică a lubrifiantului în mm^2/s, la temperatura de lucru;
- n este turația inelului interior, rot/min;
- G_{rr} este o variabilă care depinde de – tipul rulmentului; diametrul mediu al rulmentului d_m, mm; forța radială de încărcare F_r, N.

$$G_{rr} = R_1 \cdot d_m^{1,96} \cdot F_r^{0,54} \tag{3}$$

Pentru calculul componentei M_{sl} este propusă relația:

$$M_{sl} = G_{sl} \cdot \mu_{sl} \ [\text{N} \cdot \text{mm}] \tag{4}$$

unde: - G_{sl} este o variabilă care depinde de tipul rulmentului, diametrul mediu al rulmentului, d_m, mm; forța radială de încărcare F_r, N;
- μ_{sl} este coeficientul de frecare de alunecare (0,05 lubrifiere cu ulei mineral; 0,04 lubrifiere cu ulei sintetic).

$$G_{sl} = S_1 \cdot d_m^{-0,26} \cdot F_r^{5/3} \tag{5}$$

Parametrii R_1 şi S_1 au valori dependente de tipul rulmentului, tabelul 1.
La o cantitate mare de lubrifiant din zona de intrare în contact, apare fenomenul de „reverse flow”. Acest fenomen determină creşterea temperaturii în filmul de lubrifiant, implicit se va micşora grosimea filmului de lubrifiant ca urmare a reducerii vâscozității.

Momentul rezistent global se corectează cu ajutorul factorului termic pentru care este propusă relația:

Tabelul 1 *Parametrii din relaţiile (3) şi (5) dependenţi de tipul de rulmenţi, [1]*

Tipul rulmentului	Constanta geometrică pentru momentul rezistiv de rostogolire, R_1	Constanta geometrică pentru momentul rezistiv de alunecare, S_1
2, 3	$4{,}4\cdot10^{-7}$	$2{,}00\cdot10^{-3}$
42, 43	$5{,}4\cdot10^{-7}$	$3{,}00\cdot10^{-3}$
60, 630	$4{,}1\cdot10^{-7}$	$3{,}73\cdot10^{-3}$
62, 622	$3{,}9\cdot10^{-7}$	$3{,}23\cdot10^{-3}$
63, 623	$3{,}7\cdot10^{-7}$	$2{,}84\cdot10^{-3}$
64	$3{,}6\cdot10^{-7}$	$2{,}43\cdot10^{-3}$
160, 161	$4{,}3\cdot10^{-7}$	$4{,}63\cdot10^{-3}$
617, 618, 628, 637, 638	$4{,}7\cdot10^{-7}$	$6{,}50\cdot10^{-3}$
619, 639	$4{,}3\cdot10^{-7}$	$4{,}75\cdot10^{-3}$

$$\phi_{ish} = \frac{1}{1+1{,}84\cdot10^{-9}\cdot(n\cdot d_m)^{1{,}28}\cdot\nu^{0{,}64}} \tag{6}$$

Lipsa de lubrifiant în zona dintre suprafeţele deformate elastic este cunoscută şi sub numele de fenomen de „starvare" (înfometare) şi care determină reducerea grosimii filmului elastohidrodinamic. Ca urmare, momentul rezistiv global se corectează cu factorul de starvare:

$$\phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs}\cdot\nu\cdot n\cdot(D+d)\sqrt{\frac{K_z}{2\cdot(D-d)}}}} \tag{7}$$

unde: - K_{rs} este o constantă în funcţie de tipul de ungere ($3\cdot10^{-8}$ pentru un nivel mic în baie de ulei şi jet de ulei; $6\cdot10^{-8}$ pentru ungere cu unsoare consistentă);

- *D* şi *d* sunt diametrele rulmentului, mm, din catalogul de rulmenţi, (tabelul 4);
- K_z este o constantă care depinde de tipul de rulment (tabelul 2).

Tabelul 2 *Constantă de geometrie, relația (7), [1]*

Tipul rulmentului	**Constanta de geometrie** K_Z
Radial cu bile pe un rând sau pe două rânduri	3,1
Radial-axial cu bile pe un rând	4,4
Radial-axial cu bile pe două rânduri	3,1
Radial-axial cu bile contact în 4 puncte	3,1
Radial oscilant cu bile pe două rânduri	4,8

2.3. Relații simplificate de calcul

Pentru calcule rapide aprecierea momentului rezistent se poate realiza utilizând un coeficient de frecare μ care, dat fiind caracterul complex al pierderilor de putere din rulmenți, capătă semnificație simbolică:

$$M_{rf} = \mu \cdot F_r \cdot \frac{d}{2} \tag{8}$$

Valori pentru coeficientul global de frecare sunt menționate în tabelul 3.

Tabelul 3 *Coeficientul de frecare global, [1]*

Tipul rulmentului	**Simbolul tipului**	**Coeficientul global de frecare** μ
Radial cu bile pe un rând	**6**	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$
Radial-axial cu bile pe un rând	**7**	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
Radial-axial cu bile pe două rânduri	**3**	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$
Radial-axial cu bile contact în 4 puncte	**QJ**	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$
Radial oscilant cu bile pe două rânduri	**1**	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$
Radial cu role cilindrice, cu colivie şi $F_a = 0$	**NJ, NU, NUP**	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$
Radial cu role cilindrice, fără colivie		$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
Radial-axial cu role conice	**3**	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
Radial oscilant cu role butoi	**2**	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
Axial cu bile	**5**	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$
Axial cu role cilindrice	**8**	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$
Axial cu role butoi	**29**	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$

3. Instalația experimentală

3.1. Componența instalației

Instalația pentru determinarea experimentală a momentului de frecare din rulment este formată din:

- standul mecanic ce conține rulmenții de studiat;
- sistemul de comandă şi reglare a turației (mutatorul electronic);
  - variator electronic de turație funcționând pe principiul conversiei frecvenței în domeniul *f* = 1…100 Hz, pentru tensiunea alternativă de alimentare.
  - motor asincron cu rotor în scurtcircuit, cu „*p*” perechi de poli,

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \tag{9}$$

- Sistemul de măsură (punte tensometrică).

3.2. Descrierea standului

Constructiv, figura 1, standul este alcătuit din arborele *4* pe care sunt fixați doi rulmenți 6204 şi pe care se montează o bucşă *11*, care serveşte drept arbore pentru cei 4 rulmenți de tip 6212, *10*, la care se studiază momentul rezistent. Încărcarea cu forță radială a rulmenților 6212 se realizează cu ajutorul unu dispozitiv şurub - piuliță *8*, mărimea forței fiind apreciată cu un arc dinamometric *7* prevăzut cu un comparator cu cadran 9. Toate aceste elemente sunt asamblate într-un corp *13*, care este prevăzut în dreapta cu un capac înfundat, iar la stânga cu un capac străpuns *5*, etanşarea față de arborele *4* fiind de tipul cu labirint.
Antrenarea arborelui *4* în mişcare de rotație se face prin intermediul unei transmisii prin curele trapezoidale *3* de la un motor asincron cu rotor în scurtcircuit, comandat de către un variator digital de turație. Între arborele *4* şi bucşa *11* se află lamela *12* cu ajutorul căreia este transmis momentul de torsiune. Pe lamela *12* se află lipiți patru traductori tensometrici rezistivi şi care sunt legați la capul colector *2* prin conductori ce străbat arborele *4*, găurit axial. De corpul *13* sunt fixate greutățile *14* care prin intermediul acului indicator *15* şi a scării gradate *16* permite măsurarea unghiului de rotire şi deci a momentului de frecare realizat pe inelul exterior a rulmenților de studiat, *10*. În timpul funcționării arborele *4* acționează asupra lamelei *12* cu o forță determinată de valoarea momentului rezistent total din rulmenții *10*, producând deformarea prin încovoiere a lamelei, deformație sesizată de traductorii tensometrici rezistivi şi vizualizată prin intermediul capului colector la o punte tensometrică. Soluționarea constructivă este prezentată în figura 4, [2].

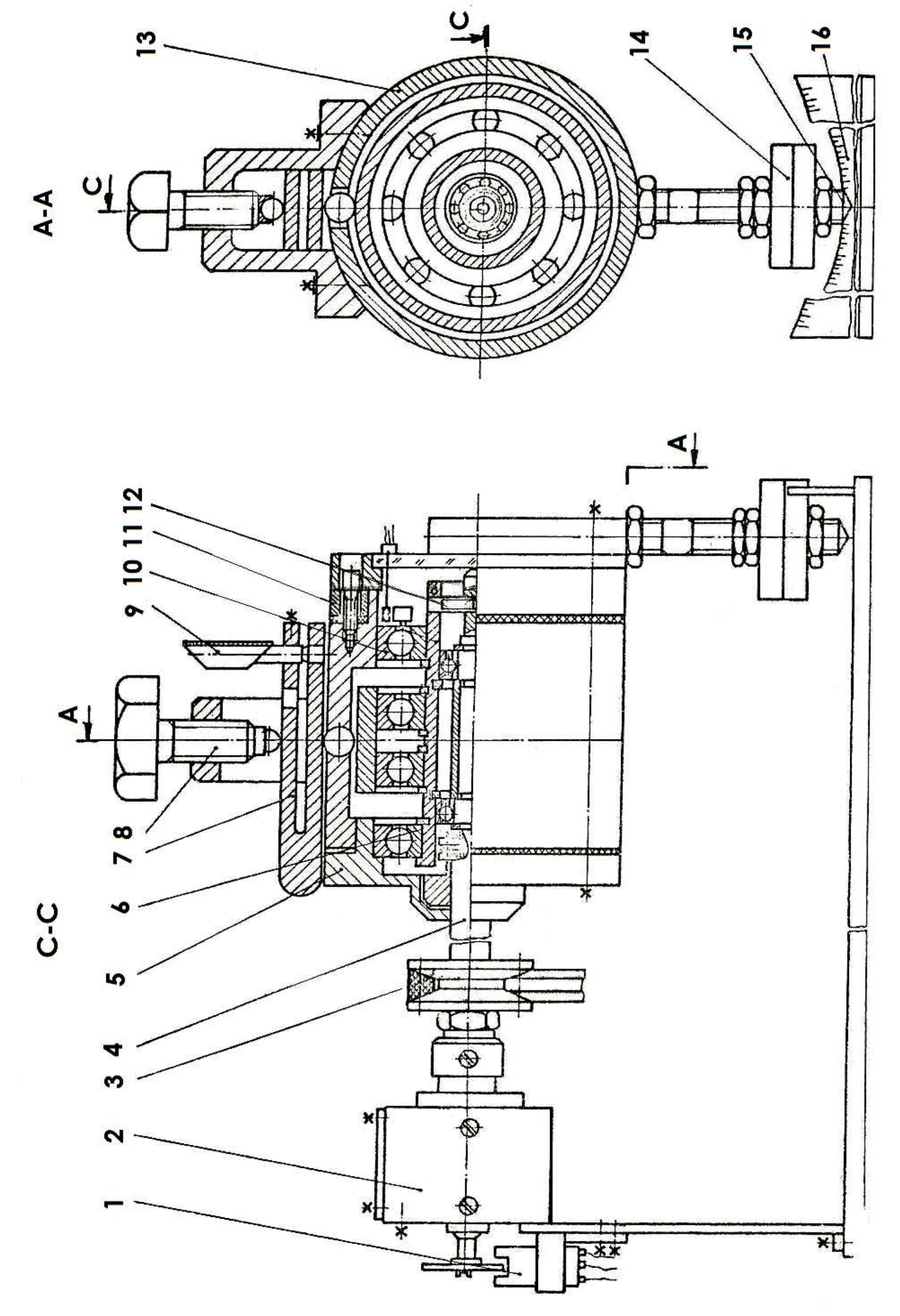


Fig. 1 *Instalația experimentală pentru măsurarea pierderilor prin frecare în rulmenți, [2]*

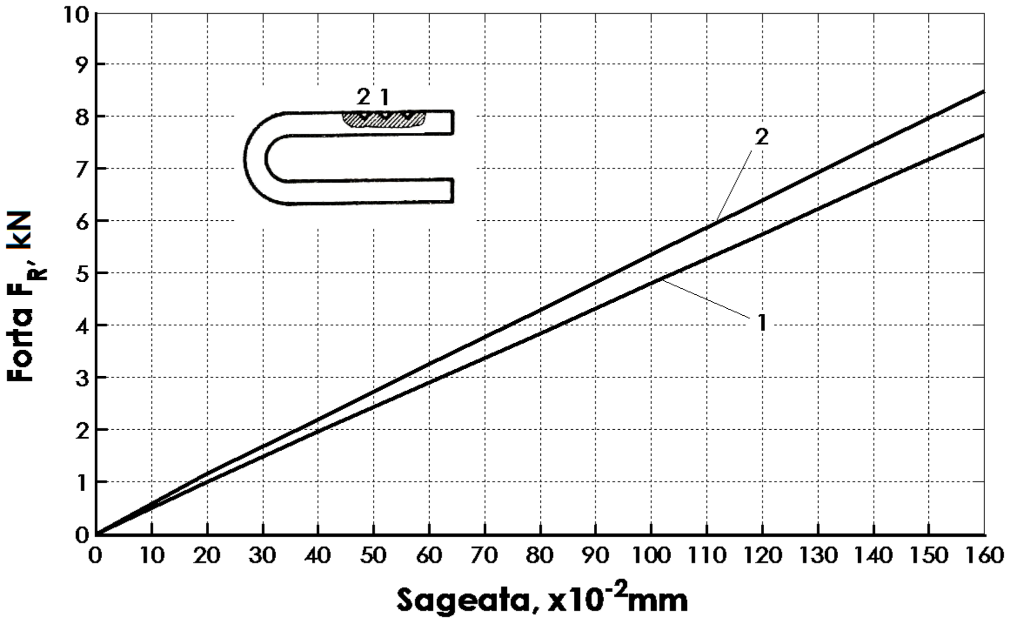


Fig. 2 *Diagramă de etalonare a arcului dinanometric, [3]*

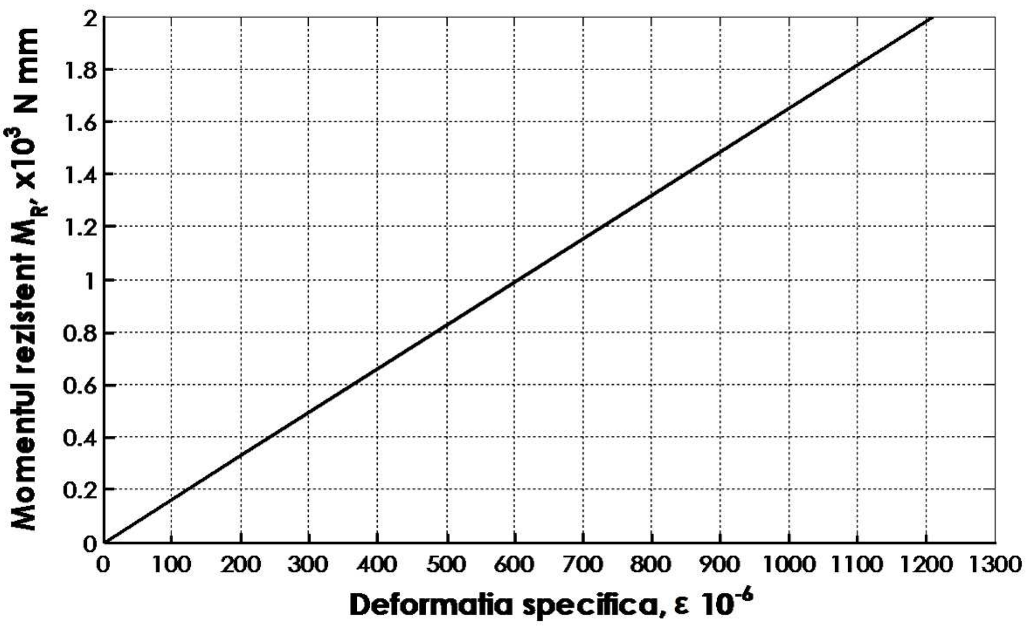


Fig. 3 *Dependența momentului rezistent în funcție de deformația lamelei*



Fig. 4 *Stand pentru studiul frecarii în rulmenții radiali*

3.3. Parametrii principali

Parametri funcționali care se apreciază în cursul determinărilor sunt:

- *turația arborelui 4* şi deci şi a inelelor interioare a rulmenților 6212, se obține cu relația (9) unde frecvența *f*, indicată de către variatorul digital, *p* – numărul de poli ai motorului asincron trifazat cu rotor în scurtcircuit. Deoarece există o alunecare de până la 5% în interiorul motorului, turația poate fi etalonată cu un stroboscop sau turometru la roata condusă a transmisiei prin curele.
- *forța radială de încărcare*, realizată de mecanismul şurub – piuliță *8* este evaluată corelând indicațiile comparatorului cu cadran 9 cu diagrama de etalonare a arcului dinamometric, prezentat în figura 2;
- *temperatura lubrifiantului* este evaluată de un termometru digital ce foloseşte un traductor o diodă semiconductoare indusă în baia de ulei;
- *momentului rezistent total* se evaluează corelând indicațiile de la puntea tensometrică cu graficul de etalonare din figura 3;
- *momentul rezistent realizat pe inelul exterior* este apreciat după măsurarea unghiului φ de rotire a corpului *13* prin relația:

$$M_{r2} = G \cdot l \cdot \sin\varphi \qquad (10)$$

unde: - *G* este greutatea pendulului, *G* = 5 Kg;
- *l* este distanța de la axa de rotație până la centrul de greutate a pendulului, (*l* = 165 mm).

4. Modul de lucru.

Se urmăreşte determinarea experimentală a dependenței momentului rezistent din rulment de condițiile de funcționare reprezentate prin mărimea forței radiale şi mărimea turației inelului interior.

4.1. Relația moment rezistent – sarcină radială

Se menține constantă valoarea turației arborelui principal, făcându-se citiri la puntea tensometrică şi pentru unghiul de rotire al pendulului corespunzător unui număr de şase valori ale forței radiale, înregistrându-se şi valoarea temperaturii uleiului din baie.

4.2. Relația moment rezistent – turație

Pentru o valoare impusă forței radiale se înregistrează aceleaşi mărimi ca şi la punctul 4.1. corespunzător unui număr de şase turații cuprinse între (100…3000 rot/min).

4.3. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Datele experimentale se trec în tabelul 5.

Se calculează:

i. momentul total rezistent
ii. momentul rezistent măsurat la nivelul inelului exterior.

Se reprezintă grafic dependențele de sarcină şi respectiv de turație, pentru cele două momente rezistente.

5. Interpretaerea rezultatelor

Diagramele trasate la punctul 4.3. sunt completate cu dependențele furnizate pentru aceleaşi condiții funcționale de :

- relațiile de calcul (1)...(7),
- relația simplificată (8) .

Se compară dependențele obținute experimental cu dependențele evidențiate analitic.

Calculele şi reprezentările grafice se realizează folosind softul MATLAB, [5], [6].

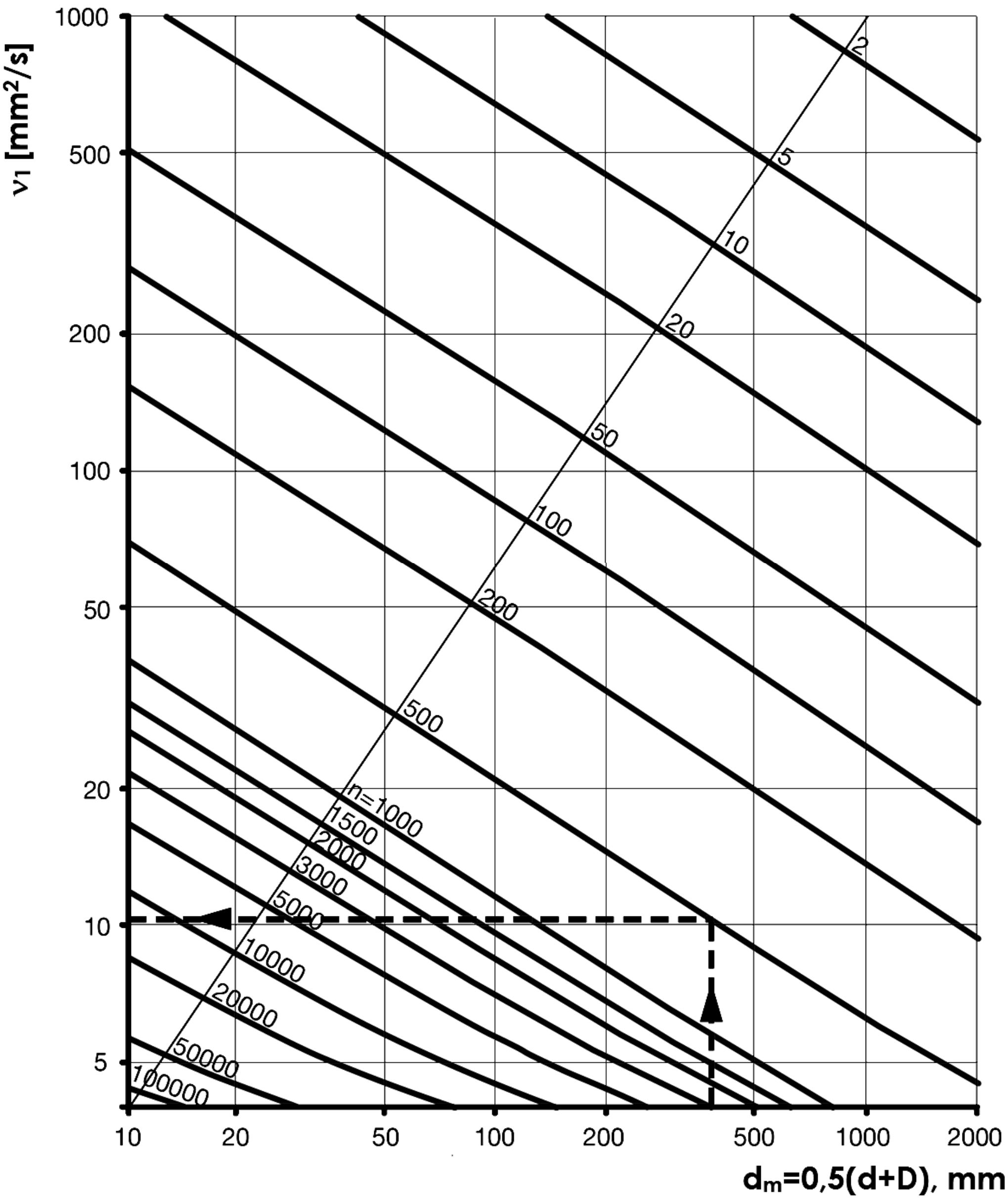


Fig. 5 *Valoarea recomandată a vâscozității cinematice la temperatura de lucru în funcție de diametrul mediu şi turație de funcționare, [4]*

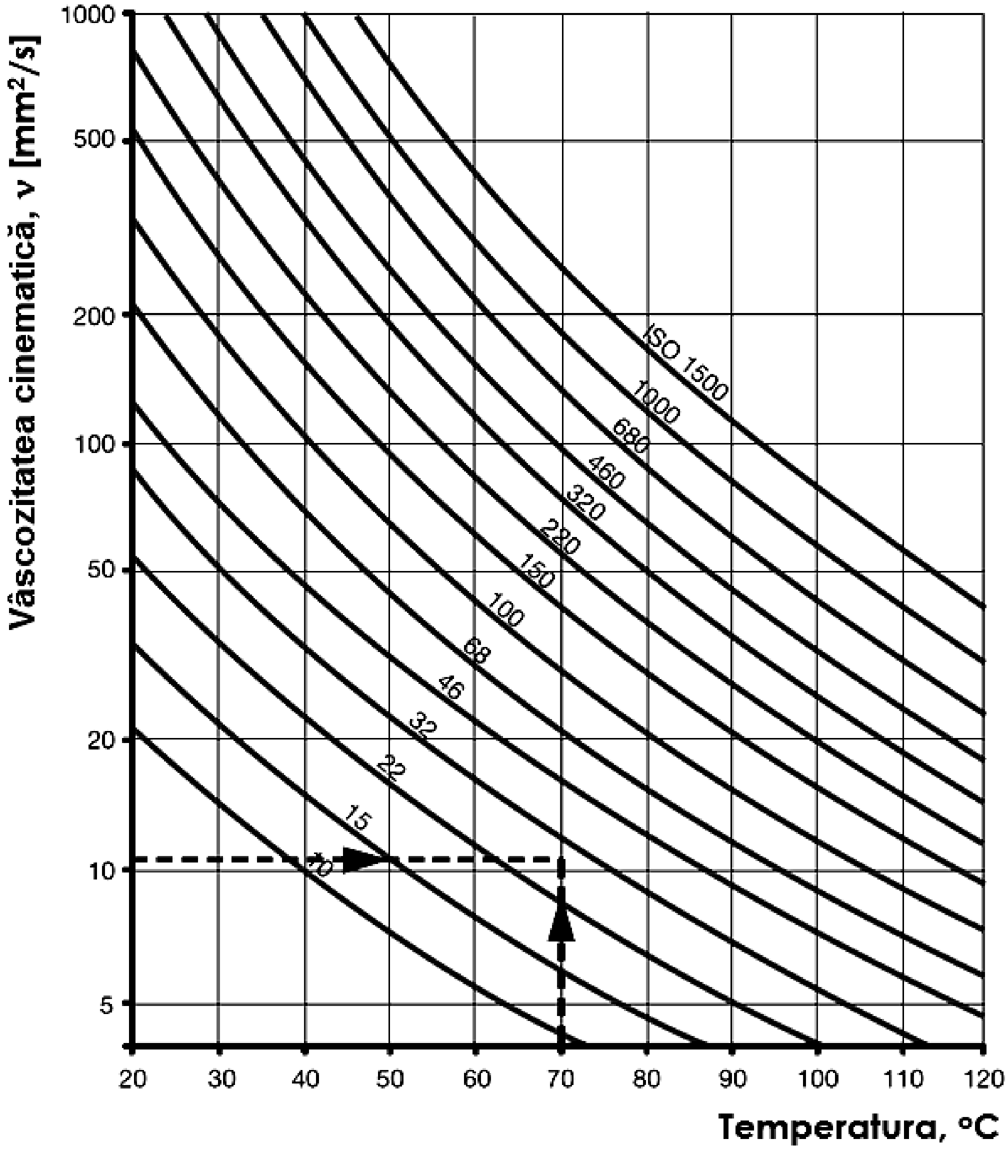


Fig. 6 *Determinarea tipului de ulei (ISO grade) funcție de temperatura de lucru si valoarea necesară a vâscozității cinematice, [4]*

Tabelul 4 *Date generale prezentate în cataloagele firmelor producătoare, [1].*

Dimensiuni principale			Valori de încărcare		Limita de încărca-re la oboseală	Turația de funcționare		Masa	Denu-mire
d mm	D mm	B mm	dinamic C kN	static C_0 kN	P_u kN	referință rot/min	Maxim rot/min	kg	-
50	65	7	6,76	6,8	0,285	20000	13000	0,052	**61810**
	72	12	14,6	11,8	0,50	19000	12000	0,14	**61910**
	80	10	16,8	11,4	0,56	18000	11000	0,18	**16010**
	80	16	22,9	16	0,71	18000	11000	0,26	**6010**
	90	20	37,1	23,2	0,98	15000	10000	0,46	**6210**
	110	27	65	38	1,60	13000	8500	1,05	**6310**
	130	31	87,1	52	2,20	12000	7500	1,90	**6410**
55	72	9	9,04	8,8	0,38	19000	12000	0,083	**61811**
	80	13	16,5	14	0,60	17000	11000	0,19	**61911**
	90	11	20,3	14	0,70	16000	10000	0,26	**16011**
	90	18	29,6	21,2	0,90	16000	10000	0,39	**6011**
	100	21	46,2	29	1,25	14000	9000	0,61	**6211**
	120	29	74,1	45	1,90	12000	8000	1,35	**6311**
	140	33	99,5	62	2,60	11000	7000	2,30	**6411**
60	78	10	11,9	11,4	0,49	17000	11000	0,11	**61812**
	85	13	16,5	14,3	0,60	16000	10000	0,20	**61912**
	95	11	20,8	15	0,74	15000	9500	0,28	**16012**
	95	18	30,7	23,2	0,98	15000	9500	0,42	**6012**
	110	22	55,3	36	1,53	13000	8000	0,78	**6212**
	130	31	85,2	52	2,20	11000	7000	1,70	**6312**
	150	35	108	69,5	2,90	10000	6300	2,75	**6412**
65	85	10	12,4	12,7	0,54	16000	10000	0,13	**61813**
	90	13	17,4	16	0,68	15000	9500	0,22	**61913**
	100	11	22,5	16,6	0,83	14000	9000	0,30	**16013**
	100	18	31,9	25	1,06	14000	9000	0,44	**6013**
	120	23	58,5	40,5	1,73	12000	7500	0,99	**6213**
	140	33	97,5	60	2,5	10000	6700	2,10	**6313**
	160	37	119	78	3,15	9500	6000	3,30	**6413**

Tabelul 4 *Date generale prezentate în cataloagele firmelor producătoare, (continuare), [1].*

Dimensiuni								Coeficienți de calcul	
d mm	d_1 mm	D_1 mm	D_2 mm	$R_{1,2min}$ mm	$d_{a\,min}$ mm	$D_{a\,max}$ mm	$r_{a\,max}$ mm	k_r	f_0
50	55,1	59,9	-	0,3	52	63	0,3	0,015	17
	56,9	65,1	-	0,6	53,2	68,8	0,6	0,02	16
	60	70	-	0,6	53,2	76,8	0,6	0,02	14
	59,8	70,3	72,8	1	54,6	75,4	1	0,025	15
	62,5	77,4	81,6	1,1	57	83	1	0,025	14
	68,8	91,1	95,2	2	59	101	2	0,03	13
	75,5	104	-	2,1	64	116	2	0,035	12
55	60,6	66,4	-	0,3	57	70	0,3	0,015	17
	63,2	71,8	-	1	59,6	75,4	1	0,02	16
	67	78,1	-	0,6	58,2	86,8	0,6	0,02	15
	66,3	78,7	81,5	1,1	61	84	1	0,025	15
	69,1	85,8	89,4	1,5	64	91	1,5	0,025	14
	75,3	99,5	104	2	66	109	2	0,03	13
	81,6	113	-	2,1	69	126	2	0,035	12
60	65,6	72,4	-	0,3	62	76	0,3	0,015	17
	68,2	76,8	-	1	64,6	80,4	1	0,02	16
	72	83	-	0,6	63,2	91,8	0,6	0,02	14
	71,3	83,7	86,5	1,1	66	89	1	0,025	16
	75,5	94,6	98	1,5	69	101	1,5	0,025	14
	81,9	108	112	2,1	72	118	2	0,03	13
	88,1	122	-	2,1	74	136	2	0,035	12
65	71,6	78,4	-	0,6	68,2	81,8	0,6	0,015	17
	73,2	81,8	-	1	69,6	85,4	1	0,02	17
	76,5	88,4	-	0,6	68,2	96,8	0,6	0,02	16
	76,3	88,7	91,5	1,1	71	94	1	0,025	16
	83,3	102	106	1,5	74	111	1,5	0,025	15
	88,4	116	121	2,1	77	128	2	0,03	13
	94	131	-	2,1	79	146	2	0,035	12

Tabelul 5 *Rezultate experimentale*

Nr. crt.	Mărimea	Unitate de măsură	Relația sau diagrama	Numărul determinării					
				1	2	3	1	2	3
1.	Indicația comparatorului	10^{-2} mm	se măsoară						
2.	Forța radială totală, F_R	N	Fig. 2						
3.	Forța radială pe un rulment, F_r	N	$F_r = F_R/4$						
4.	Frecvența, f	Hz	se măsoară						
5.	Turația, n	rot/min	$n = 57 \cdot f$						
6.	Tipul uleiului								
7.	Temperatura uleiului	°C	se măsoară						
8.	Vâscozitatea cinematică	mm^2/s	Fig. 5, 6						
9.	Unghiul φ	grade	se măsoară						
10.	M_r (măsurat)	N·mm	Fig. 3						
11.	M_{r2} (măsurat)	N·mm	Rel. (10)						
12.	M_{rr} (calculat)	N·mm	Rel. (2, 3)						
13.	M_{sl} (calculat)	N·mm	Rel. (4, 5)						
14.	ϕ_{ish}		Rel. (6)						
15.	ϕ_{rs}		Rel. (7)						
16.	M (calculat)	N·mm	Rel. (1)						
17.	μ		Rel. (8)						

Bibliografie:

1. SKF, *General Catalogue*, 2008, Sweden.
2. Crețu, S., Damian, I., *Stand pentru măsurarea momentelor de frecare în rulmenți*, Brevet RSR Nr. 89611.
3. Gafițanu, M., Crețu, Sp., Bariz, Gh., Olaru, D., Racocea, C., Hagiu, Gh., Oancea, I., Ştirbu, C., Ivănică, P., Grigoraş, Ş., 1985, *Organe de maşini, Îndrumar de laborator*, I.P.Iaşi.
4. http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/index.html
5. http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf
6. http://www.mathworks.com/academia/student_center/tutorials/launchpad.html